第 38 卷第 6 期　　生　态　学　报　　Vol.38,No.6
2018 年 3 月　　ACTA ECOLOGICA SINICA　　Mar.,2018

DOI: 10.5846/stxb201702260315
胡子瑛,周俊菊,张利利,魏伟,曹建军.中国北方气候干湿变化及干旱演变特征.生态学报,2018,38(6):1908-1919.
Hu Z Y, Zhou J J, Zhang L L, Wei W, Cao J J.Climate dry-wet change and drought evolution characteristics of different dry-wet areas in northern China. Acta Ecologica Sinica,2018,38(6):1908-1919.

中国北方气候干湿变化及干旱演变特征

胡子瑛,周俊菊*,张利利,魏　伟,曹建军
西北师范大学地理与环境科学学院,兰州　730070

摘要:利用中国北方 15 个省(区、市)320 个气象站 1960—2014 年逐月降水量资料,运用标准化降水指数(SPI)、标准差和相关分析等方法,基于不同时间尺度,对近 55 年来中国北方及不同干湿区气候干湿时空变化特征进行分析,并从干旱站次比、干旱强度等方面分析了年际干旱的时空变化特征。结果表明:①1960—2014 年中国北方地区整体呈变干趋势,年际干旱站次比和干旱强度在同步波动中均呈下降趋势。②1960—2014 年北方地区春季和冬季呈湿润化趋势,冬季湿润化趋势最明显,夏季和秋季呈干旱化趋势,夏季干旱化趋势最显著,夏季降水对年干湿状况的变化起决定性作用。③湿润区和半湿润区有干旱化趋势,而干旱区和半干旱区均呈湿润化趋势发展;湿润区和半湿润区年际干旱站次比、干旱强度呈上升趋势,而干旱区和半干旱区则相反。④中国北方东部季风区的湿润区和半湿润区以及处于季风区和非季风区分界线两侧的半湿润区和半干旱区气候干湿变化均呈显著同步波动变化趋势,而中国北方东部季风区的湿润区和半湿润区与中国北方西部非季风区的干旱区气候干湿变化呈显著反向波动变化趋势,夏季具有同样的规律,而冬季和春季四大干湿区干湿变化具有较好的同步一致性。

关键词:北方地区;气候干湿区;干湿变化;标准化降水指数(SPI)

Climate dry-wet change and drought evolution characteristics of different dry-wet areas in northern China

HU Ziying, ZHOU Junju*, ZHANG Lili, WEI Wei, CAO Jianjun
College of Geography and Enviromental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China

Abstract: The Standardized Precipitation Index (SPI), standard deviations, and correlation analysis methods were adopted to explore temporal and spatial characteristics of dry and wet climatic changes in northern China using monthly precipitation data for the last 55 years (1960—2014) from 320 stations across 15 provinces. Furthermore, based on the Drought stations proportion and drought intensity, temporospatial characteristics of annual drought were also studied. The results showed that: (1) From 1960 to 2014, there was a general trend of northern China gradually becoming arid. The annual Drought stations proportion and drought intensity declined simultaneously. (2) Although there was a trend of increasing wetness in both spring and winter, it was more obvious in the winter. On the contrary, summer and autumn had a trend of becoming arid, which was more obvious in the summer. Summer precipitation was a determining factor for variation in annual dry-wet patterns. (3) Humid and semi-humid areas tended to become more arid, whereas arid and semi-arid areas had a wetting trend. The Drought stations proportion and drought intensity increased in humid and semi-humid areas, but decreased in arid and semi-arid areas. (4) Dry-wet climatic changes in northern China's eastern monsoon area (humid and semi-humid areas) and both sides of the boundaries of the monsoon area (semi-humid and semi-arid areas) had obviously synchronous fluctuation trends. However, there were opposite fluctuation trends in northern China's eastern monsoon area (humid and

基金项目:国家自然科学基金项目(41261104);国家社科基金青年项目(12CTJ001)
收稿日期:2017-02-26;　　**网络出版日期**:2017-12-19

*通讯作者 Corresponding author.E-mail: yzh_su@163.com

semi-humid areas) and arid areas in the western non-monsoon area of northern China. Summer had the same pattern, and dry-wet changes in four dry and wet areas in winter and spring also had synchronous fluctuation trends.

Key Words: northern China; dry and wet areas; dry-wet change; Standardized Precipitation Index (SPI)

IPCC 第五次评估报告指出气候变暖是毋庸置疑的事实,20 世纪 50 年代以来大气变暖、海平面上升和温室气体增加等的速度是几十年乃至上千年的时间里前所未有的,全球变暖改变了全球水循环,高温、干旱和暴雨洪涝等极端气候事件发生频率与强度呈加剧趋势[1-2]。据统计,全球每年因干旱造成的经济损失远远超过了其他自然灾害所造成的损失。干旱是区域范围内因长期无降水或降水异常偏少而造成空气干燥土壤缺水甚至干涸的现象,是气候灾害中最主要的灾害之一,它具有出现频率高、持续时间长、波及范围广、后延影响大的特点[3]。干旱的频繁发生不仅给国民经济,特别是农业生产带来巨大损失,还会造成水资源短缺、沙尘暴增加、荒漠化加剧等诸多不利的生态影响[3-4]。对干旱进行及时监测、分析和评估十分必要[5]。干旱指数是开展干旱监测、评估干旱风险的基本依据,也是研究干旱演变特征的有效工具[6-7]。根据建立途径的不同可以把干旱指数大致归纳为两类[8],其中,通过气象学方法研究降水量的统计分布规律[3]的方法具有计算简单、指标不涉及具体的干旱机理、适应性较强的特点[8],其代表性指标是 McKee 等[9]提出的标准化降水指标(SPI, Standardized Precipitation Index)。它比帕尔默干旱指数(PDSI, Palmer Drought Severity Index)更具有统计上的一致性[10],对干旱变化反映敏感[3],并能有效消除降水的时空分布差异[11],可以更好地表现出干旱的地区差异性[10],因而得到广泛应用[3,8,12-17]。

中国北方地区干旱频发[18],干旱已成为西部开发、东北商品粮基地和华北能源基地建设的一个主要障碍,给人民的生产生活造成了严重的影响[19-20]。因此,北方地区干旱化问题一直是学术界关注的焦点[18]。虽然相关研究[13,18,21-27]应用不同干旱指数对中国北方不同地区干旱化趋势进行了分析,并取得一系列有意义的成果,但截至目前,应用标准化降水指数,基于不同气候干湿带,探讨中国北方地区气候干湿变化及其空间差异特征的研究还鲜有报道。北方地区地域广阔,气候类型多样,降水量时空分布差异大,而 SPI 指数能有效消除降水的时空分布差异,从而更好地表现出干旱的地区差异性。因此,本文选取 SPI 指数对中国北方地区及四大干湿区近 55 年气候干湿变化过程进行分析,揭示北方地区气候干湿变化规律及不同干湿区气候干湿变化的空间异质性和内在关联性特征。以期为北方地区干旱监测、预警和防灾减灾工作提供科学依据;为全球变化背景下,气候干湿区的重新厘定提供参考。

1　研究区概况

如图 1 所示,中国北方十五个省(区、市),包括东北(黑龙江省、吉林省、辽宁省)、华北(北京市、天津市、河北省、山西省、山东省、河南省、内蒙古自治区)、西北(陕西省、甘肃省、青海省、宁夏回族自治区、新疆维吾尔自治区)[28]。据《中国统计年鉴(2016)》记载,中国北方地区总面积约 577.27 万 km^2,人口约 5.76 亿,地区生产总值约 297242 亿元,耕地面积约 80.5 万 km^2,约占我国耕地总面积的 60%,2015 年农作物受灾面积约 13.9 万 km^2,其中旱灾受灾面积约 9.4 万 km^2,约占全国旱灾受灾面积的 89%。地跨湿润、半湿润、半干旱、干旱四大气候干湿区,干湿区划分依据为多年平均降水量(大于 800mm 为湿润区、400—800mm 为半湿润区、200—400mm 为半干旱区、小于 200mm 为干旱区)。

2　数据来源与研究方法

2.1　数据来源与处理

1960—2014 年中国北方地区 450 个气象站点逐月降水资料均来源于中国气象数据网(http://data.cma.cn)。为了保证数据的完整性,剔除其中缺测较多的站,选用其中 320 个站点 55a 的逐月气象观测资料,对个

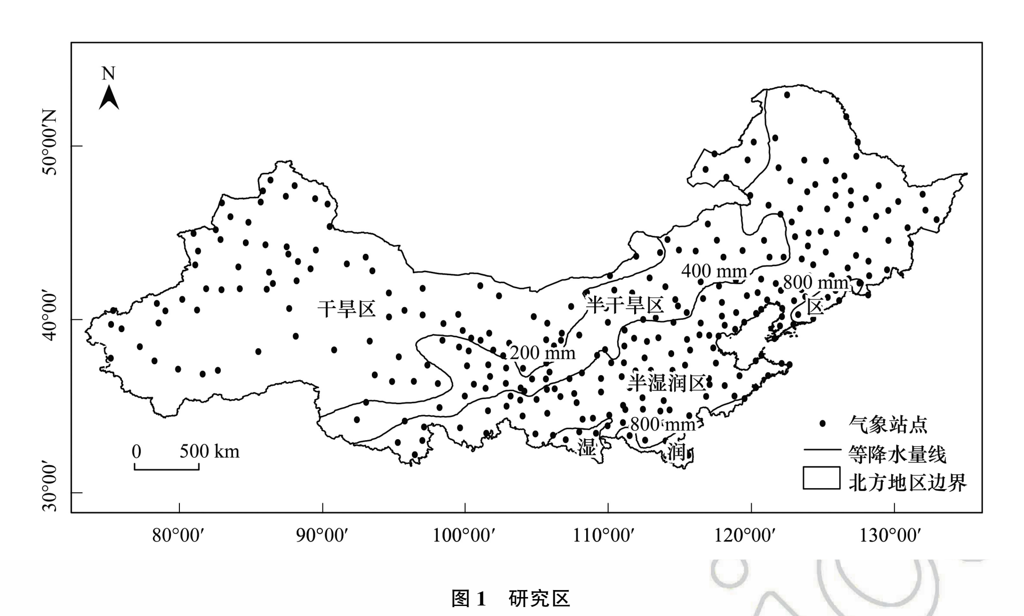


图 1 研究区

Fig.1 The study area

别月份有缺测值的 21 个气象站点,采用缺测站其余 54a 相同月份降水量的均值代替缺测值。

2.2 研究方法

2.2.1 标准化降水指数 SPI 及旱涝等级的划分

降水分布是一种偏态分布,而不是正态分布,所以在降水分析和干旱评估中,采用伽玛分布概率来描述降水量的变化,再经正态标准化后得到 SPI 值[13]。3 月尺度 SPI 可以反映短期气象旱涝特征,与农业干旱关系密切;12 月尺度 SPI 可标识长期旱涝影响及持续时段,通常与河流水位,水库水位,甚至地下水位相关度较高[3,29-30]。因此,本文选取 3 月和 12 月尺度 SPI 进行气候干湿变化分析。季节划分为:春季为 3—5 月、夏季为 6—8 月、秋季为 9—11 月、冬季为 12—次年 2 月。取每季最后 1 月的 SPI3 值、每年最后一个月的 SPI12 值作为季节和年的 SPI 值。

根据相关研究[9,31],结合北方地区实际情况,对 SPI 旱涝等级进行划分(表 1)。

表 1 SPI 旱涝等级

Table 1 Classification scales of meteorological drought for SPI

标准化降水指数 SPI Standardized precipitation index	旱涝等级 Category	标准化降水指数 SPI Standardized precipitation index	旱涝等级 Category
−0.5<SPI<0.5	正常		
−1.0<SPI≤−0.5	轻旱	0.5≤SPI<1.0	轻涝
−1.5<SPI≤−1.0	中旱	1.0≤SPI<1.5	中涝
−2.0<SPI≤−1.5	重旱	1.5≤SPI<2.0	重涝
SPI≤−2.0	特旱	SPI≥2.0	特涝

2.2.2 干旱评价指标

为了更加定量化地反映较大范围内的区域干旱发生程度,引入干旱站次比和干旱强度作为干旱评价指标[32]。

(1)干旱站次比(P_j):用某一区域内发生干旱站数占全部站数的比例来评价干旱范围的大小和严重程度,计算公式为:

$$P_j = m_j / M \times 100\% \tag{1}$$

式中:M 代表研究区气象站总数;j 指代不同年份;m_j 为 j 年发生干旱的站数。当 $P_j \geq 50\%$ 时,研究区域内有一

半以上的站发生干旱,为全域性干旱;当 50%>P_j≥33%时为区域性干旱;当 33%>P_j≥25%时为部分区域性干旱;当 25%>P_j≥10%时为局域性干旱;当 P_j<10%时为无明显干旱发生。

(2)干旱强度(S_j):用于评价干旱的严重程度,单站某时段内的干旱强度可由 SPI 值反映,SPI 绝对值越大,表示干旱越严重。计算公式为:

$$S_j = \left| \frac{1}{m} \sum_{i=1}^{m} \mathrm{SPI}_i \right| \tag{2}$$

式中:i 指不同站点代号,j 指代不同年份,m 为 j 年发生干旱的站数,SPI_i 为发生干旱的 i 站 SPI 值。由旱涝等级可知:当 S_j<0.5 时干旱强度不明显;1>S_j≥0.5 时为轻度干旱;1.5>S_j≥1 时为中度干旱; S_j≥1.5 时为重度干旱。

3　北方地区气候干湿及年际干旱变化特征

3.1　年际干湿及年际干旱变化特征

3.1.1　年际干湿变化特征

由图 2 可知,1960—2014 年北方地区年 SPI 在波动中减少,其变化倾向率为-0.051/10a,呈干旱化趋势。干旱年和湿润年分别为 15a 和 17a,重度及以上旱涝年份分别为 4a(1997、1999、2001 和 1965 年)、2a(1964 年和 1998 年)。其中,1964 年和 1997 年的 SPI 值分别为 3.09 和-2.26,分别属特涝和特旱年份。据《新中国五十年统计资料汇编(1949—1999)》、《中国统计年鉴(2002)》记载,1964、1998 年中国涝灾的受灾面积和成灾面积分别为 14.9 万 km²、10 万 km²;22.3 万 km²、13.8 万 km²,均高于一般年份,1965、1997、1999、2001 年中国旱灾的受灾面积和成灾面积分别为 13.6 万 km²、8.1 万 km²;33.5 万 km²、20.3 万 km²;30.2 万 km²、16.7 万 km²;38.5 万 km²、23.7 万 km²,均高于一般年份。说明基于年降水量的 SPI 能够较准确地监测到旱涝发生的年份。

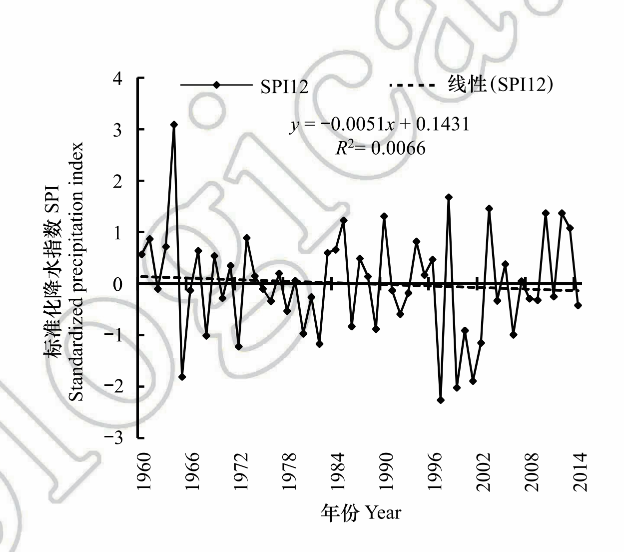


图 2　1960—2014 年北方地区年 SPI 变化

Fig. 2　Evolution of annual SPI in northern China from 1960 to 2014

SPI 指标准化降水指数

从年代际 SPI 值来看,1960s 的 SPI 为正值,有 6a 为湿润年,1970s 正常年份长达 7a,其余 3a 旱涝程度较轻,1980s、1990s 和 2000s 的 SPI 均为负值,发生干旱的年份和程度大于洪涝,为干旱期。其中 1960s 为最湿润年代,2000s 为最干旱年代。1960s—2000s 的标准差分别为 1.27、0.54、0.80、1.23、0.96,1960s 干湿波动最剧烈,其次为 1990s,1970s 干湿波动最平缓。马柱国、符淙斌[18,27]、李维京[21]、王志伟[23]、王素萍[25]等人运用不同方法均得出北方地区呈干旱化发展趋势,与本文结论较为一致。相关研究表明大气环流异常是导致降水异常、干旱频发的直接原因[33],而在 2003—2005 年,东亚季风发生了由弱到强的年代际变化[34],使得近 10 年来中国北方地区干旱化状况有所缓解。2010—2014 年 SPI 均值为 0.63,干旱化趋势有所减缓。

3.1.2　年际干旱变化特征

从图 3 可以看出,北方地区年际干旱站次比和干旱强度在同步波动中均呈下降趋势。①发生全域性干旱的有 5a,发生区域性干旱的有 13a,发生部分区域性干旱和局域性干旱的均有 18a,有 1a 无明显干旱发生。其中,站次比在 1997 年达到最大值 65.31%,与北方地区年 SPI 值最小的年份一致,其次,是 1965 年62.81%,1998 年年际干旱站次比降至最小值 9.06%,与北方地区年 SPI 值次大的年份一致。②干旱强度下降幅度较小,13a 为轻度干旱,42a 为中度干旱。其中,干旱强度在 1965 年达到最大值 1.37,为北方地区重度干旱年份,1998 年年际干旱强度降至最小值 0.82,与北方地区年 SPI 值次大的年份一致。综上所述,近 55 年来北方地区

以部分区域性干旱和局域性干旱为主,中度干旱发生的频率最高。干旱站次比较高的年份,亦是干旱强度较大的年份。

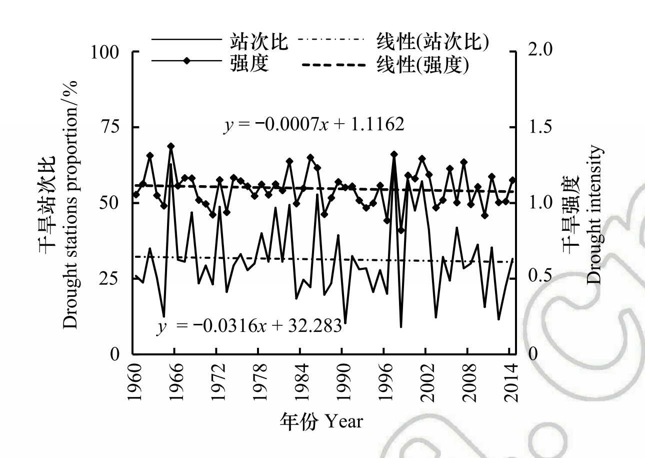


图 3 1960—2014 年北方地区干旱站次比、干旱强度变化

Fig. 3 Drought stations proportion and drought intensity in northern China from 1960 to 2014

3.2 季节干湿变化特征

由图 4 可知,1960—2014 年北方地区春季和冬季呈湿润化趋势,冬季湿润化趋势最明显,其 SPI 变化倾向率为 0.193/10a;夏季和秋季呈干旱化趋势,夏季干旱化趋势最显著,其 SPI 变化倾向率为-0.1/10a。北方地区干旱化的主要贡献者是夏季,其次为秋季。①春季,干旱年和湿润年均为 19a,重度及以上旱涝年份分别为 2a 和 4a;②夏季,干旱年和湿润年分别为 17a 和 19a,重度及以上旱涝年份分别为 5a 和 3a;③秋季,干旱年和湿润年分别为 16a 和 18a,重度及以上旱涝年份分别为 4a 和 3a;④冬季,干旱年和湿润年分别为 17a 和 21a,重度及以上旱涝年份分别为 5a 和 1a。

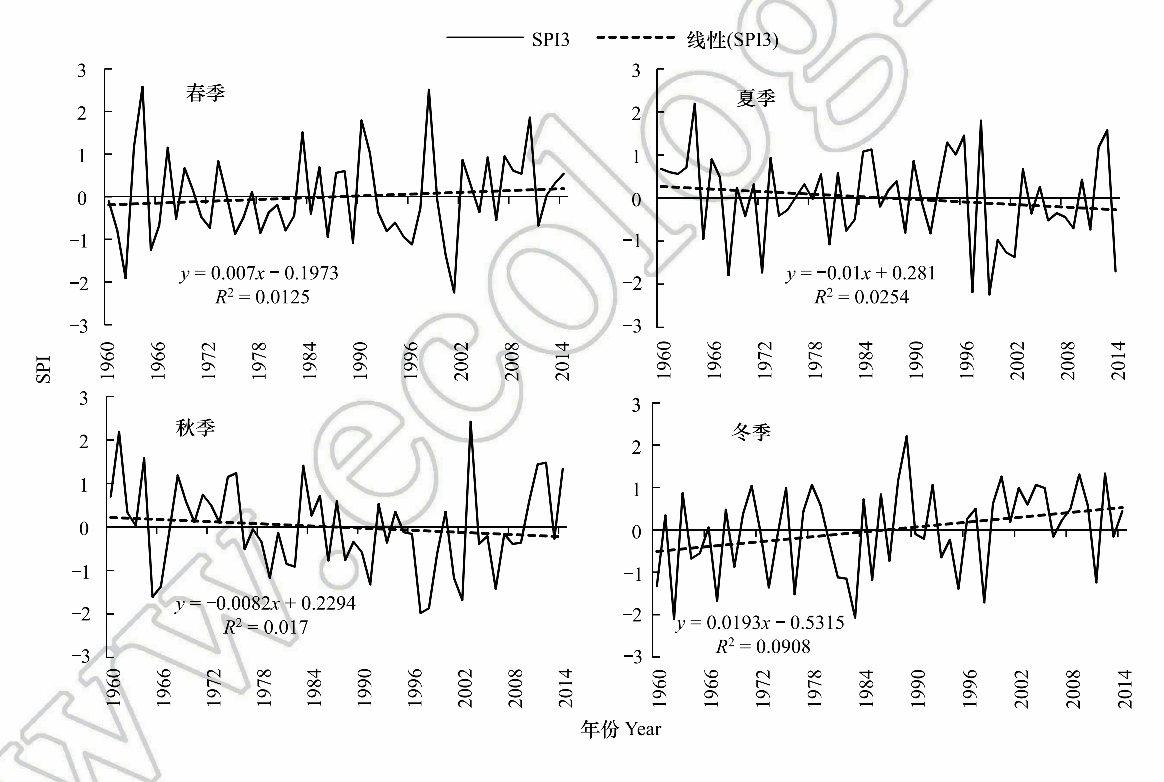


图 4 1960—2014 年北方地区四季 SPI 变化

Fig.4 Change of different seasons SPI in northern China from 1960 to 2014

不同年份的旱涝与季节旱涝之间的关系存在差异(表 2)。1964 年特涝主要由该年春季和夏季特涝所致,1998 年的重涝主要由该年春季特涝和夏季重涝所致;1965 年的重旱主要由该年的秋季重旱所致,1997 年的特旱主要由该年夏季特旱和秋季重旱所致,1999 年的特旱主要由该年夏季特旱所致,2001 年的重旱主要由该年的春季特旱所致。综上所述,典型洪涝年的发生主要是由该年春季和夏季降水偏多所致,而典型干旱年的发生与该年度夏季和秋季降水偏少联系密切。相关分析表明:北方地区年 SPI 值与夏季 SPI 值相关系数为 0.863(通过 0.001 显著性水平的检验),为四季中最大。因此,北方地区夏季降水对年干湿状况的变化起到决定性的作用。

表 2　年和季节特旱(涝)和重旱(涝)年份对照表

Table 2　Extreme drought (flood) and heavy drought (flood) year annual and seasonal drought grade table

年份 Year	旱涝等级 Category				
	年 Annual	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
1964	特涝	特涝	特涝	重涝	轻旱
1965	重旱	中旱	轻旱	重旱	轻旱
1997	特旱	正常	特旱	重旱	轻涝
1998	重涝	特涝	重涝	重旱	重旱
1999	特旱	正常	特旱	轻旱	轻涝
2001	重旱	特旱	中旱	中旱	正常

4　不同干湿区气候干湿及年际干旱变化特征

4.1　年际干湿及年际干旱变化特征

4.1.1　年际干湿变化特征

(1)干湿变化整体特征

由图 5 可以看出,北方地区不同干湿区干湿变化趋势差异显著,湿润区和半湿润区均呈干旱化趋势,半湿润区最为明显,其年 SPI 变化倾向率为-0.108/10a(通过 0.001 显著性水平的检验);而干旱区和半干旱区均

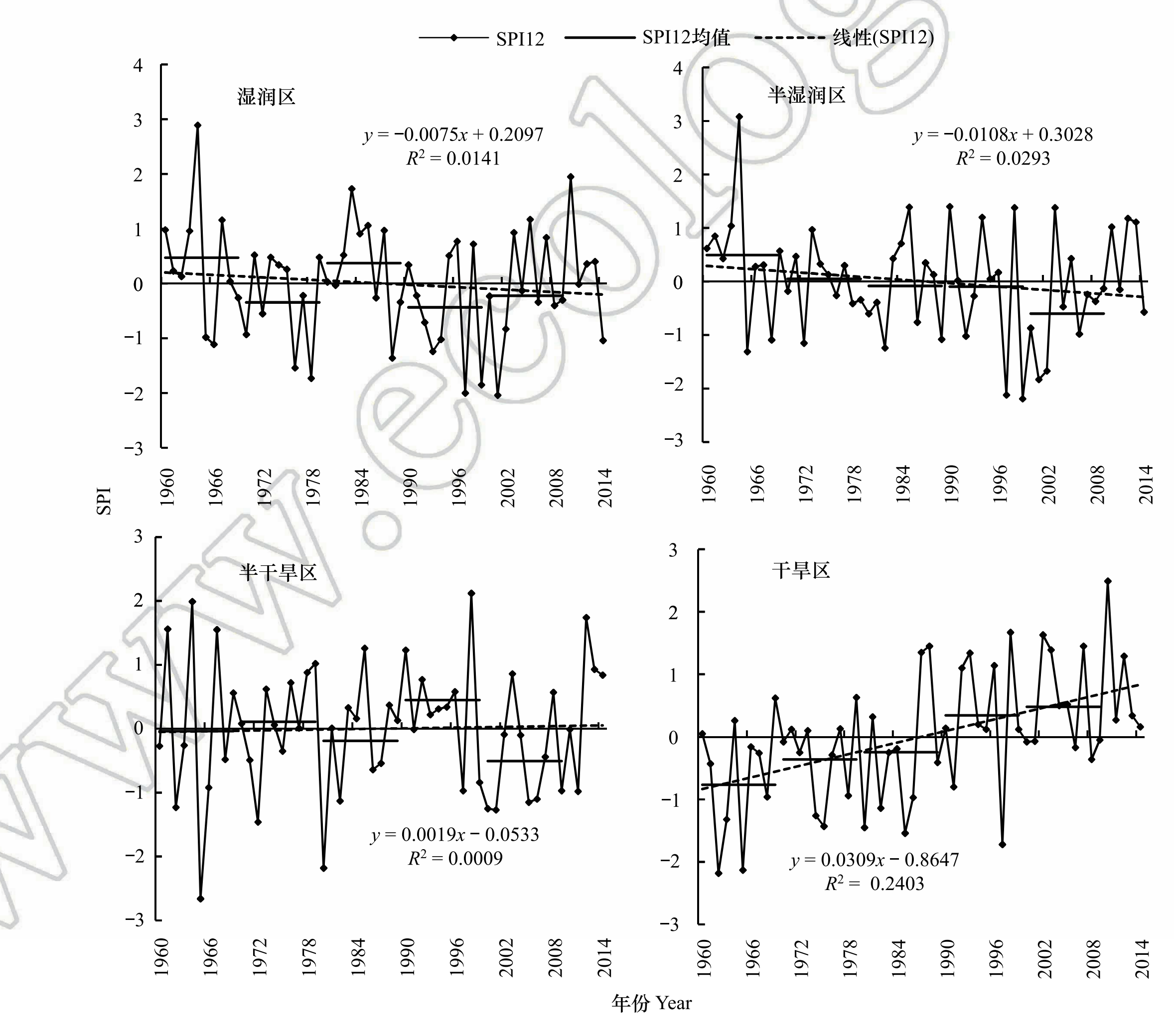


图 5　1960—2014 年不同干湿区年 SPI 变化

Fig.5　Evolution of annual SPI in different dry and wet areas from 1960 to 2014

呈现湿润化趋势，干旱区最为显著，其年 SPI 变化倾向率为 0.309/10a(通过 0.001 显著性水平的检验)。①湿润区，重度及以上旱涝年份分别为 5a 和 3a，其中，2001 年 SPI 值为-2.04，为特旱年份，1964 年 SPI 值为 2.89，为特涝年份；1960s 干旱年和湿润年分别为 2a 和 4a，为最湿润年代，1990s 干旱年和湿润年分别为 5a 和 3a，为最干旱年代；②半湿润区，重度及以上旱涝年份分别为 4a 和 1a，其中，1999 年 SPI 值为-2.19，为特旱年份，1964 年 SPI 值为 3.08，为特涝年份；1960s—2000s 一直在变干，1960s 的干旱年和湿润年分别为 2a 和 5a，为最湿润年代，2000s 干旱年和湿润年分别为 4a 和 1a，为最干旱年代；③半干旱区，重度及以上旱涝年份分别为 2a 和 5a，其中，1965 年 SPI 值为-2.66，为特旱年份，1998 年 SPI 值为 2.12，为特涝年份；2000s 干旱年和湿润年分别为 5a 和 2a，为最干旱年代，1990s 干旱年和湿润年分别为 2a 和 4a，为最湿润年代；④干旱区，重度及以上旱涝年份分别为 4a 和 3a，其中，1962 年 SPI 值为-2.18，为特旱年份，2010 年 SPI 值为 2.49，为特涝年份；1960s—2000s 一直在变湿，1960s 干旱年和湿润年分别为 4a 和 1a，为最干旱年代，2000s 干旱年和湿润年分别为 0a 和 5a，为最湿润年代，从 1980s 末开始，干旱区已进入典型的湿润期。

马柱国等的相关研究[18,26-27]表明我国北方干湿变化呈东西反向型：大致以 100°E 为界，以东地区呈干旱化趋势，尤以西北地区东部、华北和东北中南部最为明显；以西地区呈湿润化趋势，西北地区西部最为明显，这与本研究中干旱区湿润化趋势显著以及半湿润区干旱化趋势明显的结论基本一致。相关研究[18,27,35]亦表明华北从 1970s 以来干旱严重，而西北自 1980s 中期以来出现变湿趋势的原因可能与 1970s 中期至 21 世纪初东亚夏季风明显减弱有关。

(2)不同干湿区干湿变化相关性分析

从图 6 年 SPI 5a 滑动平均可以看出：①湿润区与半湿润区、半湿润区和半干旱区年 SPI 5a 滑动平均值均呈同步波动变化趋势，其中，湿润区与半湿润区年 SPI 5a 滑动平均值的相关系数为 0.673(通过 0.01 显著性水平的检验)(图 6a)，半湿润区和半干旱区年 SPI 5a 滑动平均值的相关系数为 0.387(通过 0.01 显著性水平的检验)(图 6b)；②湿润区和干旱区、半湿润区和干旱区年 SPI 5a 滑动平均值均呈反向波动变化趋势，其中，湿润区和干旱区年 SPI 5a 滑动平均值的相关系数为-0.286(通过 0.05 显著性水平的检验)(图 6c)，半湿润区和干旱区年 SPI 5a 滑动平均值的相关系数为-0.335(通过 0.05 显著性水平的检验)(图 6d)。与此同时，湿润区和半干旱区年 SPI 5a 滑动平均值的相关系数为-0.133(0.05 和 0.01 显著性水平的检验均未通过)，半干旱区和干旱区年 SPI 5a 滑动平均值的相关系数为 0.068(0.05 和 0.01 显著性水平的检验均未通过)。综上所述，中国北方东部季风区的湿润区和半湿润区以及处于季风区和非季风区分界线两侧的半湿润区和半干旱区气候干湿变化均呈显著同步波动变化趋势，而中国北方东部季风区的湿润区和半湿润区与中国北方西部非季风区的干旱区气候干湿变化呈显著反向波动变化趋势。此规律是否存在于中国更大区域范围，有待于进一步深入研究。

4.1.2 年际干旱变化特征

从图 7 可以看出，湿润区和半湿润区年际干旱站次比和干旱强度均呈增加趋势，而半干旱区和干旱区年际干旱站次比和干旱强度均呈减少趋势。①湿润区，干旱站次比有较明显的增加趋势，其变化倾向率为 2%/10a，平均值为 32.83%。55 年中有 18a 发生区域性干旱，以区域性干旱为主(表 3)；干旱强度亦呈增加趋势，其变化倾向率为 0.0147/10a，平均值为 0.88，1960—2014 年有 27a 为轻度干旱，以轻度干旱为主；②半湿润区，干旱站次比有较为明显的增加趋势，其变化倾向率为 1.79%/10a，平均值为 31.41%。有 18a 发生局域性干旱，以局域性干旱为主(表 3)；干旱强度亦呈增加趋势，其变化倾向率为 0.0135/10a，平均值为 1.08。有 36a 为中度干旱，以中度干旱为主；③半干旱区，干旱站次比有微弱的下降趋势，其变化倾向率为-0.08%/10a，平均值为 31.11%，有 18a 发生局域性干旱，以局域性干旱为主(表 3)；干旱强度亦呈微弱的下降趋势，其变化倾向率为-0.0018/10a，平均值为 1.05，有 33a 发生中度干旱，以中度干旱为主；④干旱区，干旱站次比有明显的下降趋势(通过 0.05 显著性水平的检验)，其变化倾向率为-4.76%/10a。平均值为 31.28%，有 15a 发生局域性干旱，以局域性干旱为主(表 3)；干旱强度亦呈显著的下降趋势(通过 0.01 显著性水平的检验)，其变

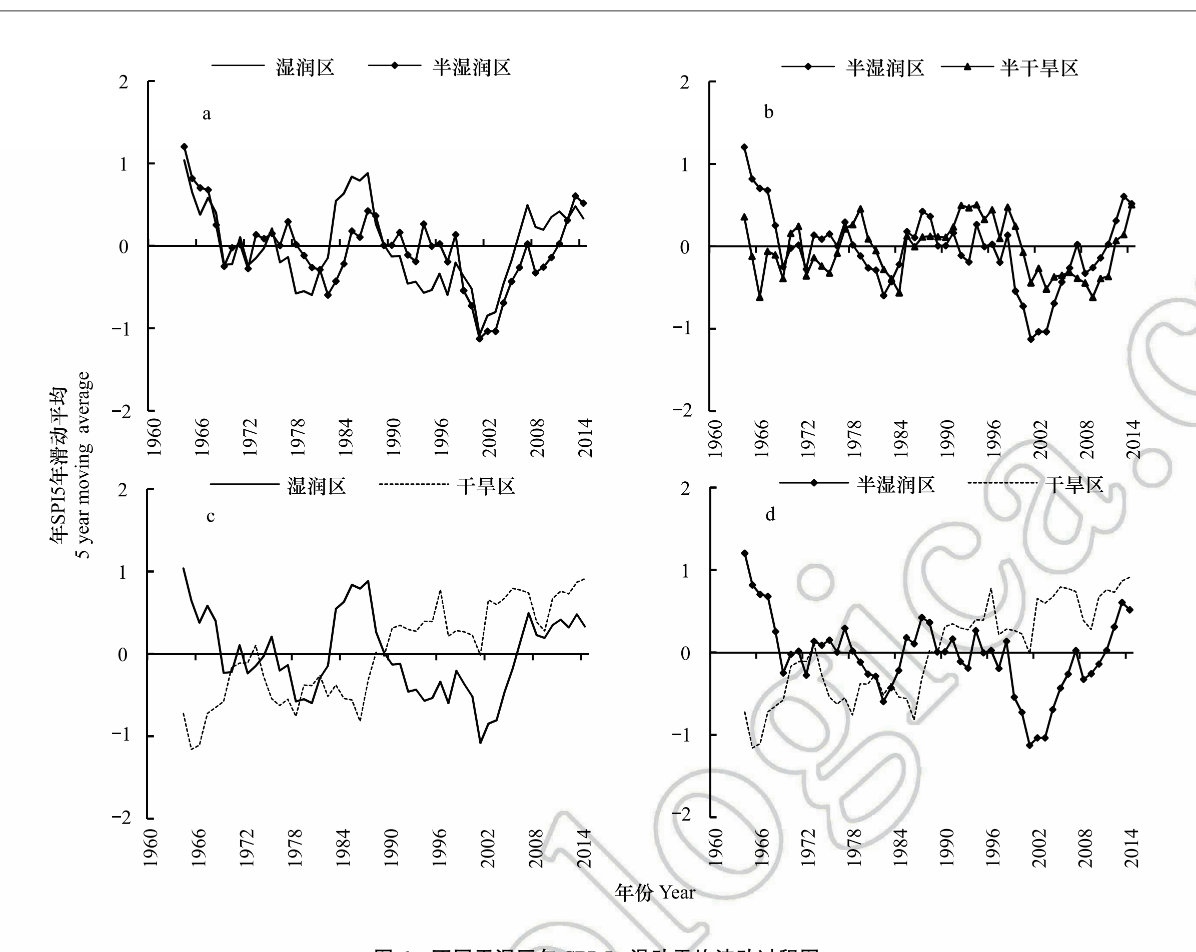


图 6　不同干湿区年 SPI 5a 滑动平均波动过程图

Fig.6　Evolution of annual SPI 5 year moving average in different dry and wet areas

表 3　1960—2014 年不同干湿区干旱站次比年份统计表

Table 3　Drought stations proportion statistics about different dry and wet areas from 1960 to 2014

干旱站次比 Drought stations proportion	湿润区 Humid area	半湿润区 Semi-humid area	半干旱区 Semi-arid area	干旱区 Arid area
全域性干旱 Universal drought	12	10	13	8
区域性干旱 Regional drought	18	11	10	12
部分区域性干旱 Partly regional drought	1	12	8	14
局域性干旱 Local drought	12	18	18	15
无明显干旱 Unconspicuous drought	12	4	6	6

化倾向率为−0.0425/10a,平均值为 1.07,有 33a 为中度干旱,以中度干旱为主。

相关研究表明,我国东北[36]、华北[37-38]等地年际干旱站次比和干旱强度均呈增加趋势,新疆[39]、内蒙古西部[40-41]等地年际干旱站次比和干旱强度均呈减少趋势。与本研究中年际干旱站次比和干旱强度在湿润区和半湿润区增加,而在干旱区和半干旱区减少的结论基本一致。

4.2　季节干湿变化特征

4.2.1　干湿变化整体特征

从图 8 可以看出,不同干湿区不同季节干湿变化情况存在较大差别。①湿润区,除冬季 SPI 呈增加趋势外,其他 3 个季节 SPI 均呈减少趋势,其中,秋季减少速度最快,干旱化趋势最明显;冬季易发生重旱及特旱(6a),春季易发生重涝及特涝(5a);②半湿润区,夏季和秋季 SPI 呈减少趋势,而春季和冬季 SPI 呈增加趋势,冬季湿润化趋势明显;夏季易发生重旱及特旱(6a),春季易发生重涝及特涝(5a);③半干旱区,除夏季 SPI

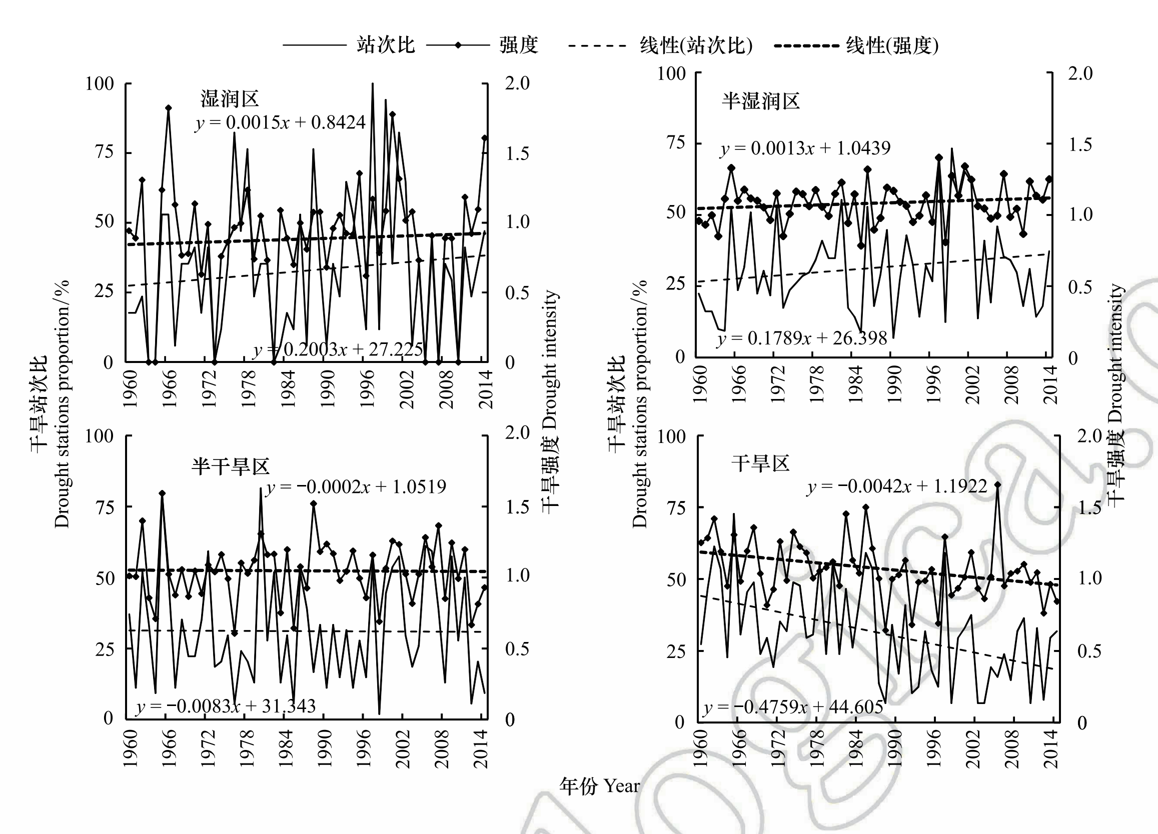


图 7 1960—2014 年不同干湿区干旱站次比、干旱强度变化

Fig.7 Drought stations proportion and drought intensity in different dry and wet areas from 1960 to 2014

呈减少趋势外,其他 3 个季节 SPI 均呈增加趋势,冬季湿润化趋势最明显;冬季易发生重旱及特旱(5a),春季易发重涝及特涝(6a);④干旱区,4 个季节均呈湿润化趋势,其中,冬季的湿润化最为显著(通过 0.001 显著性水平的检验);夏季易发生重旱及特旱(5a),春夏均易发生重涝及特涝(均为 5a)。不同干湿区均在夏冬两季易发生重旱及特旱,在春季易发生重涝及特涝。

从表 4 可以看出,湿润区、半湿润区和半干旱区极端湿润年份均与该年春季和夏季降水偏多关系密切,而干旱区极端湿润年份却主要由该年春季和秋季降水偏多所致;湿润区极端干旱年份主要由该年春旱和秋旱所致,而半湿润、半干旱区和干旱区极端干旱年份均由该年夏旱所致。

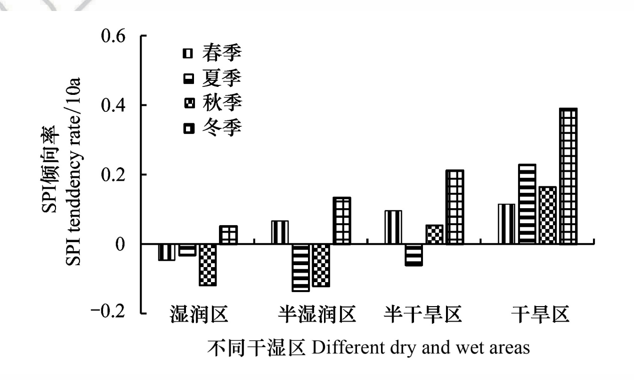


图 8 1960—2014 年不同干湿区四季 SPI 倾向率

Fig.8 Tendency rate of different seasons SPI in different dry and wet areas from 1960 to 2014

4.2.2 不同干湿区季节干湿变化相关性分析

(1)春季干湿变化相关性分析

从表 5 可以看出,春季,除湿润区与干旱区干湿变化正相关不显著(未通过任何显著性水平的检验)之外,其他各干湿区之间均存在显著正相关关系(均通过 0.05 显著性水平的检验),说明我国北方四大干湿区春季干湿旱涝变化具有较好的同步一致性。

(2)夏季干湿变化相关性分析

从表 6 可以看出,夏季,湿润区与半湿润区、半湿润区与半干旱区 SPI 存在显著正相关关系(均通过 0.01 显著性水平的检验),湿润区与干旱区、半湿润区与干旱区 SPI 存在显著负相关关系(均通过 0.01 显著性水平

的检验),说明湿润区与半湿润区、半湿润区与半干旱区夏季干湿变化具有同步一致性,而湿润区与干旱区、半湿润区与干旱区夏季干湿变化具有明显的反向波动特征,该规律与北方不同干湿区年 SPI 5a 滑动平均的相关关系非常一致。

表 4　不同干湿区特旱(涝)年份的年和季节旱涝等级对照表

Table 4　Extreme drought (flood) year annual and seasonal drought grade in different dry and wet areas

干湿区 Areas	年份 Year	旱涝等级 Category				
		年 Annual	春季 Spring	夏季 Summer	秋季 Autumn	冬季 Winter
湿润区	1964	特涝	特涝	重涝	中涝	正常
Humid area	2001	特旱	特旱	轻旱	特旱	轻涝
半湿润区	1964	特涝	特涝	特涝	重涝	轻旱
Semi-humid area	1999	特旱	正常	特旱	轻旱	轻涝
半干旱区	1965	特旱	中旱	重旱	中旱	中旱
Semi-arid area	1998	特涝	特涝	重涝	轻旱	重旱
干旱区	1962	特旱	重旱	特旱	轻涝	重旱
Arid area	2010	特涝	重涝	正常	特涝	中涝

表 5　不同干湿区春季 SPI 5a 滑动平均相关系数

Table 5　Correlation coefficients for different dry and wet areas spring SPI 5 year moving average

干湿区 Areas	湿润区 Humid area	半湿润区 Semi-humid area	半干旱区 Semi-arid area	干旱区 Arid area
湿润区 Humid area	1	0.724**	0.296*	0.154
半湿润区 Semi-humid area	0.724**	1	0.583**	0.374**
半干旱区 Semi-arid area	0.296*	0.583**	1	0.624**
干旱区 Arid area	0.154	0.374**	0.624**	1

* 代表通过了 0.05 的显著性水平检验; ** 代表通过了 0.01 的显著性水平检验

表 6　不同干湿区夏季 SPI 5a 滑动平均相关系数

Table 6　Correlation coefficients for different dry and wet areas summer SPI 5 year moving average

干湿区 Areas	湿润区 Humid area	半湿润区 Semi-humid area	半干旱区 Semi-arid area	干旱区 Arid area
湿润区 Humid area	1	0.451**	−0.244	−0.427**
半湿润区 Semi-humid area	0.451**	1	0.466**	−0.359**
半干旱区 Semi-arid area	−0.244	0.466**	1	0.250
干旱区 Arid area	−0.427**	−0.359**	0.250	1

* 代表通过了 0.05 的水平检验; ** 代表通过了 0.01 的显著性水平检验

(3)秋季干湿变化相关性分析

从表 7 可以看出,秋季,湿润区与半湿润区、半湿润区与半干旱区、半干旱区与干旱区 SPI 具有显著正相关关系(均通过 0.01 显著性水平的检验),而其他任何两个干湿区之间 SPI 的相关性均不显著,说明相邻干湿区之间秋季干湿变化具有同步一致性,而非相邻干湿区之间在秋季干湿变化过程中相关性较弱。

表 7　不同干湿区秋季 SPI 5a 滑动平均相关系数

Table 7　Correlation coefficients for different dry and wet areas autumn SPI 5 year moving average

干湿区 Areas	湿润区 Humid area	半湿润区 Semi-humid area	半干旱区 Semi-arid area	干旱区 Arid area
湿润区 Humid area	1	0.857**	0.264	−0.128
半湿润区 Semi-humid area	0.857**	1	0.473**	−0.076
半干旱区 Semi-arid area	0.264	0.473**	1	0.706**
干旱区 Arid area	−0.128	−0.076	0.706**	1

* 代表通过了 0.05 的显著性水平检验; ** 代表通过了 0.01 的显著性水平检验

(4)冬季干湿变化相关性分析

从表 8 可以看出,任何两个干湿区之间 SPI 均存在显著正相关关系(均通过 0.01 显著性水平的检验),说明我国北方四大干湿区之间冬季干湿变化具有非常好的同步一致性。

表 8 不同干湿区冬季 SPI 5a 滑动平均相关系数

Table 8 Correlation coefficients for different dry and wet areas winter SPI 5 year moving average

干湿区 Areas	湿润区 Humid area	半湿润区 Semi-humid area	半干旱区 Semi-arid area	干旱区 Arid area
湿润区 Humid area	1	0.819**	0.547**	0.442**
半湿润区 Semi-humid area	0.819**	1	0.790**	0.703**
半干旱区 Semi-arid area	0.547**	0.790**	1	0.780**
干旱区 Arid area	0.442**	0.703**	0.780**	1

*代表通过了 0.05 的显著性水平检验; **代表通过了 0.01 的显著性水平检验

5 结论

(1)北方地区年 SPI 在波动中下降,呈干旱化趋势,1964 年和 1997 年分别属特涝和特旱年份,1960s 为最湿润年代,2000s 为最干旱年代。年际干旱站次比和干旱强度均在波动中同步下降。以部分区域性干旱和局域性干旱为主,中度干旱发生的频率最高。

(2)北方地区在春冬两季呈湿润化趋势,冬季更明显,夏秋两季呈干旱化趋势,夏季更显著。夏季降水对年干湿状况的变化起到决定性的作用,为北方地区干旱化的主要贡献者。

(3)不同干湿区干湿变化趋势差异显著:湿润区和半湿润区均呈干旱化趋势,半湿润区更明显,而干旱区和半干旱区均呈湿润化趋势,干旱区更显著。湿润区和半湿润区年际干旱站次比和干旱强度均呈上升趋势,而干旱区和半干旱区则相反,干旱区下降明显。湿润区以区域性干旱为主,轻度干旱发生的频率最高,半湿润区、半干旱区和干旱区以局域性干旱为主,中度干旱发生的频率最高。

(4)不同干湿区不同季节干湿变化差别较大:湿润区、半湿润区、半干旱区和干旱区呈现湿润化趋势的季节分别为一个(冬季)、两个(春、冬季)、三个(春、秋和冬季)和四个(春、夏、秋和冬季)。湿润区、半湿润区和半干旱区极端湿润年份均与该年春夏降水偏多关系密切,而干旱区极端湿润年份却主要由该年春秋降水偏多所致;湿润区极端干旱年份主要由该年春旱和秋旱所致,而半湿润、半干旱区和干旱区极端干旱年份均由该年夏旱所致。

(5)中国北方东部季风区的湿润区和半湿润区以及处于季风区和非季风区分界线两侧的半湿润区和半干旱区气候干湿变化均呈显著同步波动变化趋势,而中国北方东部季风区的湿润区和半湿润区与中国北方西部非季风区的干旱区气候干湿变化呈显著反向波动变化趋势。夏季具有同样的规律,而冬季和春季四大干湿区干湿变化具有较好的同步一致性,秋季相邻干湿区之间干湿变化具有同步一致性,而非相邻干湿区之间干湿变化相关性较弱。

参考文献(References):

[1] 秦大河. 气候变化的事实、影响及我国的对策. 外交学院学报, 2004, (3): 14-22.

[2] IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the intergovernmental panel on climate change.New York: Cambridge University Press, 2012.

[3] 张利利, 周俊菊, 张恒玮, 王蓓, 曹建军. 基于 SPI 的石羊河流域气候干湿变化及干旱事件的时空格局特征研究. 生态学报, 2017, 37(3): 996-1007.

[4] 刘彤, 闫天池. 我国的主要气象灾害及其经济损失. 自然灾害学报, 2011, 20(2): 90-95.

[5] 蒋忆文, 张喜风, 杨礼箫, 贺缠生. 黑河上游气象与水文干旱指数时空变化特征对比分析. 资源科学, 2014, 36(9): 1842-1851.

[6] 翟盘茂, 邹旭恺. 1951—2003 年中国气温和降水变化及其对干旱的影响. 气候变化研究进展, 2005, 1(1): 16-18.

[7] Tallaksen L M, Van Lanen H A J. Hydrological Drought: Processes and Estimation Methods for Streamflow and Groundwater. Amsterdam: Elsevier

Science Limited, 2004.
[8] 袁文平, 周广胜. 标准化降水指标与 Z 指数在我国应用的对比分析. 植物生态学报, 2004, 28(4): 523-529.
[9] McKee T B, Doesken N J, Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales // Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Boston, MA: American Meteorological Society, 1993, 17(22): 179-183.
[10] Guttman N B. Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index. Journal of the American Water Resources Association, 1998, 34(1): 113-121.
[11] 袁文平, 周广胜. 干旱指标的理论分析与研究展望. 地球科学进展, 2004, 19(6): 982-991.
[12] 洪兴骏, 郭生练, 周研来. 标准化降水指数 SPI 分布函数的适用性研究. 水资源研究, 2013, 2(1): 33-41.
[13] 翟禄新, 冯起. 基于 SPI 的西北地区气候干湿变化. 自然资源学报, 2011, 26(5): 847-857.
[14] 连纲, 郭旭东, 傅伯杰, 虎陈霞. 黄土高原小流域土壤养分空间变异特征及预测. 生态学报, 2008, 28(3): 946-954.
[15] 王宏, 李晓兵, 李霞, 王丹丹. 中国北方草原对气候干旱的响应. 生态学报, 2008, 28(1): 172-182.
[16] 李文卿, 江源, 赵守栋, 张凌楠, 刘锬. 六盘山地区油松树轮宽度年表与多尺度标准化降水指数的关系. 生态学报, 2017, 37(10): 3365-3374.
[17] 曹阳, 杨婕, 熊伟, 武永峰, 冯灵芝, 杨晓光. 1961—2010 年潜在干旱对我国夏玉米产量影响的模拟分析. 生态学报, 2014, 34(2): 421-429.
[18] 马柱国, 符淙斌. 中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析. 气象学报, 2001, 59(6): 737-746.
[19] 陈红. 全国气候影响评价(2002). 北京: 气象出版社, 2003.
[20] 章芳, 苏炳凯. 我国北方干旱化趋势的预测. 高原气象, 2002, 21(5): 479-487.
[21] 李维京, 赵振国, 李想, 孙林海. 中国北方干旱的气候特征及其成因的初步研究. 干旱气象, 2003, 21(4): 1-5.
[22] 周俊菊, 石培基, 师玮. 1960—2009 年石羊河流域气候变化及极端干湿事件演变特征. 自然资源学报, 2012, 27(1): 143-153.
[23] 王志伟, 翟盘茂. 中国北方近 50 年干旱变化特征. 地理学报, 2003, 58(z1): 61-68.
[24] 余卫红, 方修琦. 近 50 年我国北方地区旱涝的时空变化. 北京师范大学学报: 自然科学版, 2001, 37(6): 838-842.
[25] 王素萍, 张存杰, 李耀辉, 冯建英, 王劲松. 基于标准化降水指数的 1960—2011 年中国不同时间尺度干旱特征. 中国沙漠, 2014, 34(3): 827-834.
[26] 马柱国, 华丽娟, 任小波. 中国近代北方极端干湿事件的演变规律. 地理学报, 2003, 58(增刊): 69-74.
[27] 马柱国, 符淙斌. 1951—2004 年中国北方干旱化的基本事实. 科学通报, 2006, 51(20): 2429-2439.
[28] 高继卿, 杨晓光, 董朝阳, 李克南. 气候变化背景下中国北方干湿区降水资源变化特征分析. 农业工程学报, 2015, 31(12): 99-110.
[29] 叶正伟. 基于 SPI 的江苏沿海开发地区旱涝演变特征分析——以盐城市为例. 地理科学, 2014, 34(4): 479-487.
[30] 王媛媛, 张勃. 基于标准化降水指数的近 40a 陇东地区旱涝时空特征. 自然资源学报, 2012, 27(12): 2135-2144.
[31] Lloyd-Hughes B, Saunders M A. A drought climatology for Europe. International Journal of climatology, 2002, 22(13): 1571-1592.
[32] 黄晚华, 杨晓光, 李茂松, 张晓煜, 王明田, 代姝玮, 马洁华. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58a 演变特征. 农业工程学报, 2010, 26(7): 50-59.
[33] 马柱国, 符淙斌. 20 世纪下半叶全球干旱化的事实及其与大尺度背景的联系. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(2): 222-233.
[34] 程龙, 刘海文, 周天军, 朱玉祥. 近 30 余年来盛夏东亚东南季风和西南季风频率的年代际变化及其与青藏高原积雪的关系. 大气科学, 2013, 37(6): 1326-1336.
[35] 邹旭恺, 张强. 近半个世纪我国干旱变化的初步研究. 应用气象学报, 2008, 19(6): 679-687.
[36] 杨晓静, 徐宗学, 左德鹏, 蔡思扬. 东北三省近 55a 旱涝时空演变特征. 自然灾害学报, 2016, 25(4): 9-19.
[37] 张玉静, 王春乙, 张继权. 基于 SPEI 指数的华北冬麦区干旱时空分布特征分析. 生态学报, 2015, 35(21): 7097-7107.
[38] 周丹, 张勃, 罗静, 张春玲, 安美玲, 王东. 基于 SPEI 的华北地区近 50 年干旱发生强度的特征及成因分析. 自然灾害学报, 2014, 23(4): 192-202.
[39] 慈晖, 张强, 肖名忠. 多种气象干旱指数在新疆干旱评价中的应用对比研究. 中山大学学报: 自然科学版, 2016, 55(2): 124-133.
[40] 那音太. 基于 SPI 指数的近 50a 内蒙古地区干旱特征分析. 干旱区资源与环境, 2015, 29(5): 161-166.
[41] 周扬, 李宁, 吉中会, 顾孝天, 范碧航. 基于 SPI 指数的 1981—2010 年内蒙古地区干旱时空分布特征. 自然资源学报, 2013, 28(10): 1694-1706.